絶対加速度応答のみの計測に基づく 2 段階からなる構造システム同定

TWO STAGE BASED STRUCTURAL SYSTEM IDENTIFICATION UTILIZING ABSOLUTE ACCELERATION RESPONSE INFORMATION

仁田佳宏*, 西谷 章**
Yoshihiro NITTA and Akira NISHITANI

This paper proposes a two stage based structural system identification technique utilizing absolute accelerations. At the first stage, the modal vectors of a structure and the bandpass filtered input ground accelerations are estimated by means of the proper orthogonal decomposition technique. At the second stage, the ARX model-based identification is conducted using the filtered absolute acceleration responses and input ground accelerations for the purpose of obtaining more precise information of the modal characteristics and re-estimating the input ground acceleration. The validity of the proposed methodology is demonstrated by conducting computer simulations and scale-model experiments.

Keywords : *System identification, Proper orthogonal decomposition, ARX model, Bandpass filter, Absolute acceleration measurement, Input ground acceleration*

システム同定、固有直交関数展開、ARX モデル、バンドパスフィルタ、絶対加速度計測、入力地震加速度

1. はじめに

計測制御技術の発展とともに、建築分野におけるシステム同定は、建築構造物の動特性把握のみならず、制震（振）構造物の性能評価や制御対象構造物のモデル化、建築構造物の損傷検定などの有効な手段として、重要性が増大している。

一般的なシステム同定は、地震動や常時微振動などを入力、構造物の応答を出力として、入出力をともに計測するか、出力のみを計測し入力は白色雑音などの確率過程として仮定して、動特性を推定する。入出力をともに計測してシステム同定を行うためには、出力としての応答と構造物への入力の両者を同期させながら計測する必要がある。建築構造物が高層になればなるほど、計測システムが複雑となり、コストも膨らむ。さらに、建築構造物と地盤の相互作用などの影響により正確な入力を計測できない場合も存在する。また、建築構造物の応答のみを計測し、入力を仮定する場合には、仮定の妥当性を検討する必要がある、仮定が妥当でなければ同定した動特性と真の動特性とが大きく異なる可能性がある。このように、システム同定においては、入力の影響は大きく、精度の高い動特性の推定のためには、入力の取り扱いが重要となる。

また、一般的に、出力となる建築構造物の応答は、計測の容易さ

および器材コストを考慮して、絶対加速度応答が用いられる場合が多い。入力の計測も入力に関する仮定も必要とせずに、絶対加速度応答を計測するのみで、動特性を推定できれば、簡易な計測システムによる実用的なシステム同定手法になりえると考えられる。このような入力の計測も仮定も必要としないシステム同定となりえる手法の一つとして、固有直交関数展開 (POD)^{3,4)}を用いた同定手法が考えられる。POD とは相関行列の固有値解析を意味し、この手法を構造物の応答の相関行列に適用するとモードベクトルが容易に推定できることが知られている。既往の研究⁵⁻⁸⁾においても、POD を絶対加速度応答に適用したモードベクトルの推定手法と建築構造物の動特性の同定手法が提案されている。ただし、これらの手法をそのまま地震応答⁵⁻⁸⁾に適用すると、地盤-構造物連成系のモード形状と動特性が推定されることとなり、構造物そのものの動特性の推定には、入力地震加速度が必要となる。

そこで本研究では、基礎の回転の影響の小さいせん断型構造物を対象として、絶対加速度応答のみを出力として計測する構造特性の同定手法を提案する。提案する手法は、2 段階からなる。第 1 段階では、まず POD を用いて、バンドパスフィルタに通した絶対加速

本論文は、2002年度建築学会大会、第34回ストカスティックシステムシンポジウムで発表した内容(文献[1],[2])をもとにしているが、手法の改良、新たな計算、実験を行ってまとめ直したものである。

* 早稲田大学理工学部建築学科 専任助手・博士(工学)

** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・Ph. D.・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Ph. D., Dr. Eng.

度応答からモードベクトルを推定する。そして、この POD により求められたモードベクトルを用いて、各モードの周波数成分に対応する入力地震加速度を推定する。第 2 段階では、推定した入力地震加速度を入力、バンドパスフィルタに通した絶対加速度応答を出力とする ARX モデルにより構造物の動特性を同定する。この同定した構造物の動特性と観測した構造物の絶対加速度応答を用いて、付随的に、入力地震加速度波形を推定することもできる。著者らの既往の研究^{1,2)}では、第 1 段階と第 2 段階でバンド幅の異なるバンドパスフィルタを用いていたが、本研究ではより簡便な手法を目指して、第 1 段階と第 2 段階で同一のバンドパスフィルタを用いて同定を行うこととする。本研究の特色は、既往のものとは異なり、固有振動数のおおまかな値さえ得られれば入力計測を必要とすることなく、絶対加速度応答のみで建築構造物の動特性評価と入力推定が可能となる点である。さらに、建築構造物内で計測された入力は、建築構造物と地盤の相互作用による影響を受けていると考えられるが、本手法では、このような影響が除かれた正確な地震動入力の推定も期待できる。本論文では、提案手法の有効性を数値解析と小型構造物模型実験により確認する。

2. システム同定の基本概念

本研究の同定手法は、POD によりモードベクトルを推定し、推定したモードベクトルを用いて入力地震加速度の推定を行う第 1 段階と ARX モデルにより構造物の動特性の同定を行う第 2 段階からなる。第 1 段階においては、入力地震加速度の影響を小さくするため、バンドパスフィルタを用いて、各モードの周波数帯域に相当する絶対加速度応答を求め、この応答に POD を適用して、モードベクトルを求める。そして、各モードの周波数成分に対応する入力地震加速度を推定する。第 2 段階では、推定した入力地震加速度を入力、バンドパスフィルタに通した絶対加速度応答を出力とする ARX モデルにより、構造物の動特性を同定する。最後に、この同定した構造物の動特性と観測した構造物の絶対加速度応答を用いて、付随的に入力地震加速度波形を求める。

ただし、事前情報として、出力データのみで構成される AR モデルによる予備同定を行い、固有振動数を推定しておく。この予備推定した固有振動数を基に、同定に用いるバンドパスフィルタの振動数帯域を設定する。以上の提案するシステム同定手法の手順を整理すると次のようになる。

- ① AR モデルによる予備同定によって固有振動数を推定し、バンドパスフィルタの振動数帯域を設定する。
 - ② バンドパスフィルタにより分離した各モードの振動数帯域に相当する絶対加速度応答に POD を適用し、モードベクトルを推定する。
 - ③ 推定したモードベクトルを用いて各モードに対応する振動数帯域の入力地震加速度を推定する。
 - ④ 各モードごとに、バンドパスフィルタ通過後の絶対加速度応答を出力、推定した入力地震加速度を入力とする ARX モデルを構築し、構造物の動特性を同定する。
 - ⑤ 逆問題として、同定した構造物の伝達関数を用いて、入力地震加速度波形を推定する。
- ここで、①—③が同定の第 1 段階、④—⑤が同定の第 2 段階となる。

以下、②—⑤を具体的に示す。ただし、同定にあたっては、 M 層分の応答を計測するものとする。

- ② 下の式 (1) で表される各モードの固有振動数帯域の絶対加速度応答の相関行列 $\mathbf{R}_j$ に POD を適用してモードベクトルを求める。POD により求めた最大固有値に対応する固有ベクトルがモードベクトルとなる。

$$\mathbf{R}_j = E[\mathbf{Y}_j \mathbf{Y}_j^T] \quad (1)$$

ここに、

$$\mathbf{Y}_j = [\mathbf{y}_j(0) \cdots \mathbf{y}_j(N)]$$

を表し、 $\mathbf{y}_j(k)$ はバンドパスフィルタ通過後の、 j 次モード周波数帯域の M 層分の応答からなるベクトルである。ただし、平均値はゼロであるものとする。

- ③ 各モードの振動数帯域に相当する入力地震加速度を求める。 i 層の j 次モードについての絶対加速度応答 $y_{ij}(k)$ は、POD により求めた i 層の j 次のモードベクトル ϕ_{ij} を用いて、

$$y_{ij}(k) = \phi_{ij} \zeta_j(k) + u_j(k) \quad (2)$$

と表すことができる。ただし、 $\zeta_j(k)$ は j 次のモード加速度応答、 $u_j(k)$ は j 次モードに相当する振動数帯域の入力地震加速度。

式 (2) より、 j 次モードに相当する振動数帯域の入力地震加速度 $u_j(k)$ は、 j 次モードに相当する n 層の絶対加速度応答 $y_{nj}(k)$ と m 層の絶対加速度応答 $y_{mj}(k)$ から、次のように求められる。

$$u_j(k) = y_{mj}(k) - \phi_{mj} \times \frac{y_{mj}(k) - y_{nj}(k)}{\phi_{mj} - \phi_{nj}} \quad (3)$$

式 (3) に用いる応答の組合せが複数考えられる場合は、2 つの層のモードベクトル成分の差 $\phi_{mj} - \phi_{nj}$ が一番大きくなるような組合せを採用する。これは、 j 次モードの 2 つの層のモードベクトル成分の差 $\phi_{mj} - \phi_{nj}$ が大きいほど、誤差が小さく、 j 次モード振動数帯域の入力地震加速度 $u_j(k)$ を正確に推定できる傾向があることによる。

- ④ 式 (3) から求めた j 次モードに相当する振動数帯域の入力地震加速度 $u_j(k)$ を入力とし、バンドパスフィルタ通過後の絶対加速度応答 $y_j(k)$ を出力とする以下の ARX モデルを構築する⁹⁻¹¹⁾。

$$y_j(k) = -\sum_{q=1}^Q a_q y_j(k-q) + \sum_{q=0}^Q b_q u_j(k-q) + e(k) \quad (4)$$

ここで、 Q は、ARX モデルの次数を表し、最小 AIC 推定法⁹⁾を用いて定める。式 (4) より、各モードごとの i 層のパルス伝達関数 $H_i(z)$ は次のように求められる。

$$H_i(z) = \frac{b_{i0} + b_{i1}z^{-1} + \dots + b_{iQ}z^{-Q}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_Qz^{-Q}} = b_{i0} + \sum_{q=1}^Q \frac{r_{iq}}{1 - P_qz^{-1}} \quad (5)$$

ただし、 b_{iq} は b_q の i 層についての要素を、 P_q は極を、 r_{iq} は留数を表す。式 (5) 中の極と留数のうち、 j 次モードに対応するものを用いて、 j 次モードのモード特性を求める。ここで、 j 次モードに対応する極を P_j 、留数を r_{ij} と添字を付け直すことにすれば、 j 次モードの固有振動数 f_j 、減衰定数 h_j およびモードベクトル ϕ_{ij} は、それぞれ以下のようになる^{10,11)}。

$$f_j = \frac{|\log P_j|}{2\pi\Delta t} \quad (6)$$

$$h_j = \frac{-\log|P_j|}{2\pi f_j \Delta t} \quad (7)$$

$$\phi_{ij} = \text{Re} \left[\frac{2r_{ij}\sqrt{1-h_j^2}}{2\pi f_j \Delta t (h_j - i \text{sgn}[Im[P_j]](1-2h_j^2))} \right] \quad (8)$$

ただし、 Δt はサンプリング時間を、 $\text{Re}[\bullet]$ は複素数の実部を、 $\text{Im}[\bullet]$ は複素数の虚部を表す。また、 $i = \sqrt{-1}$ とする。式 (8) は、各モードごとに同定を行っているため、一般的な ARX モデルによる同定と異なり、刺激関数となるとは限らない。そこで、式 (8) のモードベクトルが刺激関数となるように補正を行う。観測した絶対加速度応答は M 層分であることから、 M 次モードまでの刺激関数の総和が 1.0 となるものとして、刺激係数 β_j を次の拘束条件 (9) を満たすように求める¹²⁾。

$$\sum_{j=1}^M \beta_j \phi_{ij} = 1.0 \quad (9)$$

この刺激係数 β_j を用いて、式 (8) のモードベクトルを刺激関数に補正する。

⑤ 推定した M 次モードまでの固有振動数、減衰定数および刺激関数により算出した伝達関数を用いて、 $s = i\omega$ として、逆問題的にラプラス変換した入力地震加速度 $u(s)$ を次のように推定する。

$$u(s) = H_n(s)^{-1} y_n(s) \quad (10)$$

ここで、

$$H_n(s) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{-\beta_j \phi_{nj} s^2}{s^2 + 2h_j \omega_j s + \omega_j^2}$$

であり、 $y_n(s)$ はラプラス変換された n 層の絶対加速度応答である。この推定した $u(s)$ を逆変換することで、入力地震加速度の時刻歴が得られる。ただし、拘束条件 (9) から推定できるモード数および伝達関数の振動数帯域が決まるため、推定できる入力地震加速度の振動数帯域は制限を受ける。

3. 数値解析による確認

3.1 構造物モデル

提案する同定手法の妥当性を確認するために、多層構造物モデルを対象とした数値解析を行う。多層構造物モデルは、鉄骨造の 20 層事務所ビルを想定した、20 自由度のせん断型構造物モデルとする。構造物の総重量は約 20,200 t とし、減衰は剛性比例型の粘性減衰を仮定し、1 次振動に対して減衰比 0.02 とする。表 1 に構造物の振動数および減衰定数を、表 2 に正確な刺激関数の一部を示す。数値解析では、システム同定のための出力データとして、それぞれ 2.0m/s² に基準化した El Centro 1940 NS と Hachinohe 1968 EW の 2 種類の地震波に対する 20 層、14 層、8 層の絶対加速度応答を用いる。サンプリング時間間隔は $\Delta t = 0.1$ 秒とし、継続時間を 35 秒 とする。

3.2 構造物の構造特性の推定

最初に、各モードそれぞれに対応するバンドパスフィルタの振動数帯域を設定するために、絶対加速度応答データを用いた AR モデルによる予備同定を行う。AR モデルを用いた同定結果を、El Centro 1940 NS の出力データについては表 3 に、Hachinohe 1968 EW の出力データについては表 4 に示す。表中の括弧の値は、推定値の真値に対する比を表す。

表 3、4 の結果より、AR モデルを用いた予備同定によって、減衰は正確ではないが、構造物の固有振動数はほぼ正確に同定できていることが確認できる。

表 1 振動数および減衰定数の真値

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	0.563	0.0200
2 次	1.376	0.0488
3 次	2.204	0.0782

表 2 刺激関数の真値

	1 次モード	2 次モード	3 次モード
20 層	1.450	-0.702	0.392
14 層	0.960	0.294	-0.245
8 層	0.487	0.408	0.251

表 3 振動数および減衰定数 (El Centro 1940 NS)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	0.560 (0.995*)	0.0184 (0.920*)
2 次	1.400 (1.018*)	0.0493 (1.009*)
3 次	2.125 (0.964*)	0.0354 (0.452*)

※: 推定値の真値に対する比

表 4 振動数および減衰定数 (Hachinohe 1968 EW)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	0.593 (1.054*)	0.0640 (3.203*)
2 次	1.404 (1.021*)	0.0454 (0.930*)
3 次	2.186 (0.991*)	0.0753 (0.962*)

※: 推定値の真値に対する比

この固有振動数の同定結果から、バンドパスフィルタの通過周波数帯域を、1次モード成分に対しては0.3～0.9 Hz、2次モード成分に対しては1.1～1.7 Hz、3次モード成分に対しては1.9～2.5 Hzと設定する。各モードごとに、絶対加速度応答をバンドパスフィルタに通し、固有振動数近傍の振動数帯域のみを持つ絶対加速度応答を求める。この各モードごとの絶対加速度応答に、PODを適用しモードベクトルを推定する。El Centro 1940 NSの出力をもとに推定したモードベクトルを表5に、Hachinohe 1968 EWの出力から推定した結果を表6に示す。ただし、モードベクトルは、各モードとも20層の値が1となるように基準化している。また表中の括弧の値は、推定値の真値に対する比を表す。

次に推定したモードベクトルを用いて、式(3)のように各モードごとにARXモデルの入力となる入力地震加速度を推定する。この式(3)により推定した入力地震加速度を入力、バンドパスフィルタ通過後の絶対加速度応答を出力とするARXモデルを構築して、各モードごとに構造物の動特性を同定する。ARXモデルにより推定した3次モードまでの固有振動数、減衰定数、刺激関数を表7～10に示す。表7、8はEl Centro 1940 NSの出力から推定した結果であり、表9、10はHachinohe 1968 EWの出力から推定した結果である。表中の括弧の値は、推定値の真値に対する比を表す。

表7～10の結果より、絶対加速度応答のみから、ほぼ正確に構造物のモード特性を同定できることが確認できる。1次、2次モードと比較して、3次モードの刺激関数の推定精度が低下しているのは、本来は各層において、20次モードまでの刺激関数の総和が1となることを、3次モードまでの総和が1となるように条件(9)を課して求めているためである。

最後に推定した構造物の伝達関数から、逆問題的にラプラス変換された入力地震加速度を求め、この入力地震加速度を逆FFTすることで、時刻歴波形を推定する。本数値解析は、3点観測であるため、構造物の伝達関数の3次モードまでが正しく推定できる。そこで本数値解析では、表9の3次モードの固有振動数の同定結果が2.075 Hzであることから、推定する入力地震加速度の周波数帯域を、0.0～2.0 Hzと設定した。最上層の伝達関数を用いて推定した入力地震加速度を、El Centro 1940 NSについては図1に、Hachinohe 1968 EWについては図2に示す。

表5 モードベクトル (El Centro 1940 NS)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.000 (1.000 [*])	1.000 (1.000 [*])	1.000 (1.000 [*])
14層	0.663 (1.001 [*])	-0.426 (1.019 [*])	-0.690 (1.106 [*])
8層	0.339 (1.011 [*])	-0.555 (0.955 [*])	0.601 (0.940 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

表6 モードベクトル (Hachinohe 1968 EW)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.000 (1.000 [*])	1.000 (1.000 [*])	1.000 (1.000 [*])
14層	0.639 (0.964 [*])	-0.356 (0.852 [*])	-0.732 (1.172 [*])
8層	0.316 (0.942 [*])	-0.582 (1.002 [*])	0.476 (0.744 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

表7 振動数および減衰定数 (El Centro 1940 NS)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1次	0.561 (0.996 [*])	0.0200 (1.000 [*])
2次	1.389 (1.009 [*])	0.0476 (0.975 [*])
3次	2.161 (0.980 [*])	0.0767 (0.973 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

表8 刺激関数 (El Centro 1940 NS)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.360 (0.938 [*])	-0.648 (0.924 [*])	0.288 (0.735 [*])
14層	0.890 (0.927 [*])	0.291 (0.991 [*])	-0.181 (0.740 [*])
8層	0.461 (0.947 [*])	0.370 (0.907 [*])	0.169 (0.672 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

表9 振動数および減衰定数 (Hachinohe 1968 EW)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1次	0.573 (1.018 [*])	0.0205 (1.030 [*])
2次	1.326 (0.964 [*])	0.0472 (0.967 [*])
3次	2.075 (0.941 [*])	0.0736 (0.941 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

表10 刺激関数 (Hachinohe 1968 EW)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.448 (0.998 [*])	-0.699 (0.995 [*])	0.251 (0.640 [*])
14層	0.912 (0.950 [*])	0.259 (0.882 [*])	-0.172 (0.701 [*])
8層	0.458 (0.940 [*])	0.427 (1.047 [*])	0.115 (0.457 [*])

^{*}: 推定値の真値に対する比

(a) 推定加速度

(b) バンドパスフィルタ通過後の地震加速度

図1 El Centro 1940 NSの地震加速度推定

(a) 推定加速度

(b) バンドパスフィルタ通過後の地震加速度

図2 Hachinohe 1968 EW の地震加速度推定

図1、2より、ほぼ正確にバンドパスフィルタを通した入力地震加速度を推定できることが確認できる。

同定精度に対する観測ノイズの影響を考察する目的で、入力 of 2乗平均値の10%の2乗平均値をもつバンドリミテッドホワイトノイズを付加した絶対加速度応答に本手法を適用する。本手法により推定した3次モードまでの固有振動数、減衰定数、刺激関数を、El Centro 1940 NS については表11、12に、Hachinohe 1968 EW については表13、14に示す。表11-14の結果より、絶対加速度応答に観測ノイズが付加されていても、1次、2次の低次モードについては、ほぼ正確に構造物のモード特性を同定できることが確認できる。ただし、3次モードの減衰に関しては、同定精度が低下している。

以上の数値解析の結果から、本研究の手法により、絶対加速度応答のみを用いて構造物の動特性とバンドパスフィルタ通過後の入力地震加速度を推定できることを確認した。

4. 実験による検証

提案手法の有効性の検証を目的に、図3に示すような、10層の小型構造物模型を用いた実験を行う。振動台による実験では、入力地震波として、それぞれ80cm/s²に基準化したEl Centro 1940 NSとHachinohe 1968 EWの2種類を用い、構造物の応答として、10層、6層、3層の絶対加速度応答を計測した。ただし、サンプリング時間間隔は $\Delta t=0.005$ 秒としている。

同定に用いる入出力データは、サンプリング時間間隔を1次モードに対しては $\Delta t=0.025$ 秒、2次モードに対しては $\Delta t=0.02$ 秒、3次モードに対しては $\Delta t=0.01$ 秒となるようにそれぞれデシメーションを行う。また同定には、40秒間分の計測データを用いることとする。

まず小型構造物模型の固有振動数の目安を得るため、ARモデルを用いたシステム同定を行う。ARモデルによる予備同定結果をEl Centro 1940 NSについては表15に、Hachinohe 1968 EWについては表16に示す。ただし、絶対加速度応答を0.5～8.5 Hzの周波数帯

表11 振動数および減衰定数 (El Centro 1940 NS)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1次	0.561 (0.996 [*])	0.0200 (1.000 [*])
2次	1.392 (1.012 [*])	0.0473 (0.975 [*])
3次	2.172 (0.985 [*])	0.0689 (0.881 [*])

*: 推定値の真値に対する比

表12 刺激関数 (El Centro 1940 NS)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.360 (0.938 [*])	-0.697 (0.993 [*])	0.234 (0.859 [*])
14層	0.905 (0.943 [*])	0.287 (0.979 [*])	-0.193 (0.787 [*])
8層	0.461 (0.946 [*])	0.351 (0.861 [*])	0.188 (0.750 [*])

*: 推定値の真値に対する比

表13 振動数および減衰定数 (Hachinohe 1968 EW)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1次	0.573 (1.018 [*])	0.0206 (1.030 [*])
2次	1.327 (0.964 [*])	0.0478 (0.980 [*])
3次	2.081 (0.944 [*])	0.0685 (0.876 [*])

*: 推定値の真値に対する比

表14 刺激関数 (Hachinohe 1968 EW)

	1次モード	2次モード	3次モード
20層	1.514 (1.044 [*])	-0.781 (1.112 [*])	0.267 (0.681 [*])
14層	0.939 (0.978 [*])	0.265 (0.903 [*])	-0.204 (0.834 [*])
8層	0.474 (0.973 [*])	0.396 (0.971 [*])	0.130 (0.518 [*])

*: 推定値の真値に対する比

図3 小型構造物模型

表 15 振動数および減衰定数 (El Centro 1940 NS)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	1.187	0.0325
2 次	3.757	0.0001
3 次	6.415	0.0022

表 16 振動数および減衰定数 (Hachinohe 1968 EW)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	1.208	0.0362
2 次	3.719	0.0223
3 次	6.384	0.0057

表 17 モードベクトル (El Centro 1940 NS)

	1 次モード	2 次モード	3 次モード
10 層	1.000	1.000	1.000
6 層	0.777	-0.375	-0.950
3 層	0.447	-0.990	0.793

表 18 モードベクトル (Hachinohe 1968 EW)

	1 次モード	2 次モード	3 次モード
10 層	1.000	1.000	1.000
6 層	0.770	-0.365	-0.922
3 層	0.429	-0.984	0.791

域のバンドパスフィルタに通している。

この表 15、16 による予備同定結果から、第 1 段階のバンドパスフィルタの通過周波数帯域を 1 次モード成分については 0.9 ~ 1.5 Hz、2 次モード成分については 3.5 ~ 4.1 Hz、3 次モード成分については 6.1 ~ 6.7 Hz と設定する。このバンドパスフィルタを通した各モードの振動数に相当する絶対加速度応答に POD を適用し、モードベクトルを推定する。表 17 に El Centro 1940 NS の応答からの推定結果を、表 18 に Hachinohe 1968 EW の応答からの推定結果を示す。ただし、モードベクトルは、各モードの 10 層の値が 1 となるように基準化している。

次に各モードごとに、表 17、18 に示すモードベクトルにより推定した入力地震加速度を入力、バンドパスフィルタ通過後の絶対加速度応答を出力とする ARX モデルを構築して、小型構造物模型の動特性を同定する。ARX モデルにより推定した 3 次モードまでの固有振動数、減衰定数、刺激関数を、El Centro 1940 NS については表 19、20 に、Hachinohe 1968 EW については表 21、22 に示す。

最後に ARX モデルによる同定結果を用いて小型構造物模型の伝達関数を求め、逆問題的に入力地震加速度を推定する。本研究の実験においては、正しく推定できるのは伝達関数の 3 次モードまでである。そこで、推定する入力地震加速度の周波数帯域を、2 次モードと 3 次モードの間の谷である 5.0 Hz までと設定した。最上層の伝達関数を用いて推定した入力地震加速度を、El Centro 1940 NS については図 4 に、Hachinohe 1968 EW については図 5 に示す。図 4、5 より、地震波によらず、ほぼ正確にローパスフィルタを通した入力地震加速度を推定できることが確認できる。

表 19 振動数および減衰定数 (El Centro 1940 NS)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	1.172	0.0052
2 次	3.745	0.0052
3 次	6.376	0.0025

表 20 刺激関数 (El Centro 1940 NS)

	1 次モード	2 次モード	3 次モード
10 層	1.300	-0.423	0.123
6 層	0.967	0.155	-0.122
3 層	0.500	0.413	0.087

表 21 振動数および減衰定数 (Hachinohe 1968 EW)

モード	固有振動数 [Hz]	減衰定数
1 次	1.191	0.0055
2 次	3.721	0.0051
3 次	6.388	0.0029

表 22 刺激関数 (Hachinohe 1968 EW)

	1 次モード	2 次モード	3 次モード
10 層	1.264	-0.386	0.122
6 層	0.972	0.150	-0.122
3 層	0.538	0.376	0.086

(a) 推定加速度

(b) バンドパスフィルタを通した入力地震加速度

図 4 El Centro 1940 NS の地震加速度推定

ここで、小型構造物模型の動特性の同定精度を確認する目的で、本研究の手法により求めた絶対加速度に関する最上層の伝達関数のゲインと入力も計測した ARX モデルにより求めた伝達関数のゲイン、FFT を用いて下の式 (11) ¹³⁾ により求めた伝達関数のゲインを、El Centro 1940 NS については図 6 において、Hachinohe 1968 EW については図 7 において比較している。ただし、FFT により伝達関数

図5 Hachinohe 1968 EW の地震加速度推定

$H(i\omega)$ を求める際には、Hamming ウィンドウ¹⁴⁾を用いている。

$$H(i\omega) = \frac{S_{io}(i\omega)}{S_{ii}(\omega)} \quad (11)$$

ただし、 $S_{io}(i\omega)$ ：入力地震加速度と最上層の絶対加速度応答のクロススペクトル密度、 $S_{ii}(\omega)$ ：入力地震加速度のパワースペクトル密度。

これらの図において、それぞれのゲインは比較的良好に一致しており、本研究の手法により構造物の動特性を精度良く同定できていることが確認できる。

以上、観測ノイズの混入をさせられない実験においても、提案手法により、絶対加速度応答のみを用いて構造物の動特性と入力地震加速度を同定できることを確認し、本手法の有効性を検証した。

5. まとめ

本研究では、絶対加速度応答のみを用いた構造物の動特性と入力地震加速度の推定手法を提案し、その有効性を数値解析および小型模型による振動台実験により示した。

本手法は、絶対加速度応答のみから、PODにより推定したモードベクトルを用いて、入力地震加速度を推定できるため、入力地震加速度の計測を必要としない。そのため、入力地震加速度の計測が困難な場合においても、精度の良い同定が可能である。また、本手法により、バンドパスフィルタに通した波形ではあるが、入力地震加速度を推定できるため、構造物の影響を受けていない純粋な入力地震加速度波形が得られる可能性がある。

以上から、本手法を用いることで、よりコンパクトで、精度の良い、構造物のシステム同定と入力地震加速度の推定が可能となると考えられる。

本研究は、2002年度早稲田大学特定課題研究（課題番号 2002A-564）による援助を受けた。

参考文献

- 仁田佳宏, 西谷章: 絶対加速度出力のみによる構造物のシステム同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B1, pp.313-314, 2002.8
- YNitta and A.Nistani: System identification methodology based on absolute acceleration measurements, *Abstracts, The 34th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Application* (第34回システムシステマシンポジウム), Fukuoka, Japan, pp.56-57, 2002.10
- 田村幸雄: 固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ, 日本風工学会誌, No.65, pp.33-41, 1995.10
- Y.Tamura, S.Suganuma, H.Kikuchi and K.Hibi: Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field, *Journal of Fluids and Structures*, No.13, pp.1069-1095, 1999
- 滝田貢, 飛田潤, 毛呂眞, 伊藤敬一: 多点同時記録による応答モードの評価, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.493-502, 1997.3
- 滝田貢: 多点同時記録による応答モードの評価 (その2 微小地震動による応答モードの評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) BII, pp.727-728, 1997.9
- 滝田貢, 飛田潤, 毛呂眞, 伊藤敬一: 多点同時記録による応答モードの評価 (その3 地盤の立体応答モード特性), 構造工学論文集, Vol.44B, pp.67-76, 1998.3
- 滝田貢, 飛田潤, 毛呂眞, 伊藤敬一: 応答モード解析法による地盤・建物系の多点同時記録の分析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1297-1302, 1998.11
- 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論, 計測自動制御学会, 1993.7
- 斎藤知生: モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, No.508, pp.47-54, 1998.6
- 池田芳樹: 地震観測記録を用いた構造同定の精度について, 第2回日本制震(振)シンポジウム論文集, pp.503-510, 2000.11
- A.Nishitani, Y.Nitta and S.Yamada: Model reduction for active-controlled building structures, *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol.3, pp.2231-2240, 1999.2
- 日本建築学会: 建築物の減衰, 日本建築学会, 2000.10
- 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5

(2002年12月6日原稿受理, 2003年4月1日採用決定)